EJERCICIOS DE ESTRUCTURAS METÁLICAS Y MIXTAS III

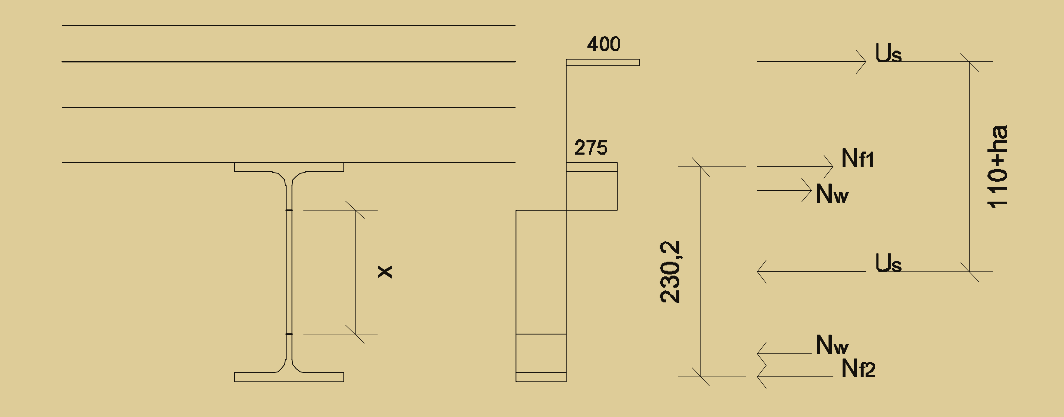
PIEZAS A FLEXIÓN

por

JORGE CONDE CONDE

ALEJANDRO BERNABEU LARENA

PAULA FUENTES GONZÁLEZ



CUADERNOS

DEL INSTITUTO

JUAN DE HERRERA

DE LA *ESCUELA DE*

ARQUITECTURA

DE MADRID

1-87-03

EJERCICIOS DE ESTRUCTURAS METÁLICAS Y MIXTAS III

PIEZAS A FLEXIÓN

por

JORGE CONDE CONDE
ALEJANDRO BERNABEU LARENA
PAULA FUENTES GONZÁLEZ

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

1-87-03

C U A D E R N O S
D E L I N S T I T U T O
J U A N D E H E R R E R A

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

TEMAS

1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN
0 VARIOS



Ejercicios de Estructuras Metálicas y Mixtas III.
Piezas a flexión.

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Almudena Gil Sancho.
CUADERNO 372.01 / 1-87-03
ISBN-13 (obra completa): 978-84-9728-417-2
ISBN-13: 978-84-9728-420-2
Depósito Legal: M-14572-2012

Presentación

Estos cuadernillos tienen su origen como apoyo docente al Módulo M4 (Estructuras de Acero) del Máster Oficial de Estructuras de Edificación de la ETSAM. Pensamos así mismo que pueden servir de referencia y utilidad a toda persona interesada en el campo de las estructuras metálicas de edificación.

El ejercicio central del módulo es el proyecto completo de una estructura metálica a nivel profesional. Dicho proyecto es desarrollado en grupo por los alumnos, efectuándose un seguimiento continuo del mismo durante el curso. Para garantizar que los alumnos poseen las herramientas necesarias para el trabajo exigido se imparten una serie de clases teóricas alrededor del material acero, que se completan con los presentes ejercicios, planteados como aplicación directa de los conceptos de teoría.

El módulo se estructura en dos grandes unidades conceptuales: el análisis y dimensionado de piezas, y el análisis y dimensionado de nudos. Los ejercicios que se presentan en este primer conjunto de cuadernos corresponden a la primera parte, de análisis de piezas:

I. Determinación de esfuerzos.

II. Propiedades seccionales.

III. Piezas a flexión.

IV. Piezas a compresión.

Los autores confían en poder ofrecer en breve la segunda parte, de nudos y detalles de conexión, cuyo interés es incluso mayor, dada la escasa bibliografía disponible al respecto.

Más allá del seguimiento estricto y de la aplicación directa (y en ocasiones ciega) de la normativa, aunque respetándola, los ejercicios plantean un análisis claro y profundo de los fenómenos que rigen el análisis y dimensionado de una estructura metálica, considerando así mismo las cuestiones y criterios constructivos, fundamentales en el proyecto de cualquier estructura, y más aún si esta es metálica.

En este sentido, el lector observará que, para preservar la unidad, y a pesar de ser enunciados independientes y autónomos, todos los ejercicios giran en torno a un edificio único. Se pretende así que el conjunto de ejercicios abarque las distintas cuestiones y problemas presentes en el proceso habitual de planteamiento, análisis y desarrollo de una estructura metálica.

Agradecemos a Paula Fuentes su sufrida labor, a Santiago Huerta la confianza depositada al designarnos como profesores del módulo y su apoyo en la publicación de estos cuadernos de ejercicios, y a José Luis de Miguel su interés y sus siempre afilados y pertinentes comentarios.

Madrid, febrero 2012

Jorge Conde Conde

Alejandro Bernabeu Larena

INDICE

Objetivo del ejercicio

Dimensionar piezas metálicas y mixtas a flexión simple.

Enunciado

De la planta tipo del edificio, dimensionar la correa aislada interior y la correa continua interior.

Se supondrán los perfiles lateralmente arriostrados y sin problemas de aplastamiento ni abolladura.

1. Correa interior biapoyada, solución metálica con perfil laminado.
2. Correa interior biapoyada, solución mixta con perfil laminado.
3. Correa continua interior, solución metálica con perfil laminado.
4. Correa continua interior, solución mixta con perfil laminado.

En las piezas mixtas se supondrán las dimensiones indicadas para la chapa. Se dimensionará la conexión con pernos soldados y la armadura necesaria en la capa de compresión.

Se aportan como base los diagramas de momentos y cortantes calculados en régimen elástico para una pieza de rigidez constante, así como los momentos isostáticos para cada vano.

Materiales: S27JR, HA-25, B500S.

Categoría de sobrecargas de uso C. Tabiquería convencional.

CONSTRUCCIÓN APEADA.

L = 7,200m; S = 2,520m; H = 4,040m.

150 91 59 121 84 90 58 147 205

CORREA BIAPOYADA INTERIOR

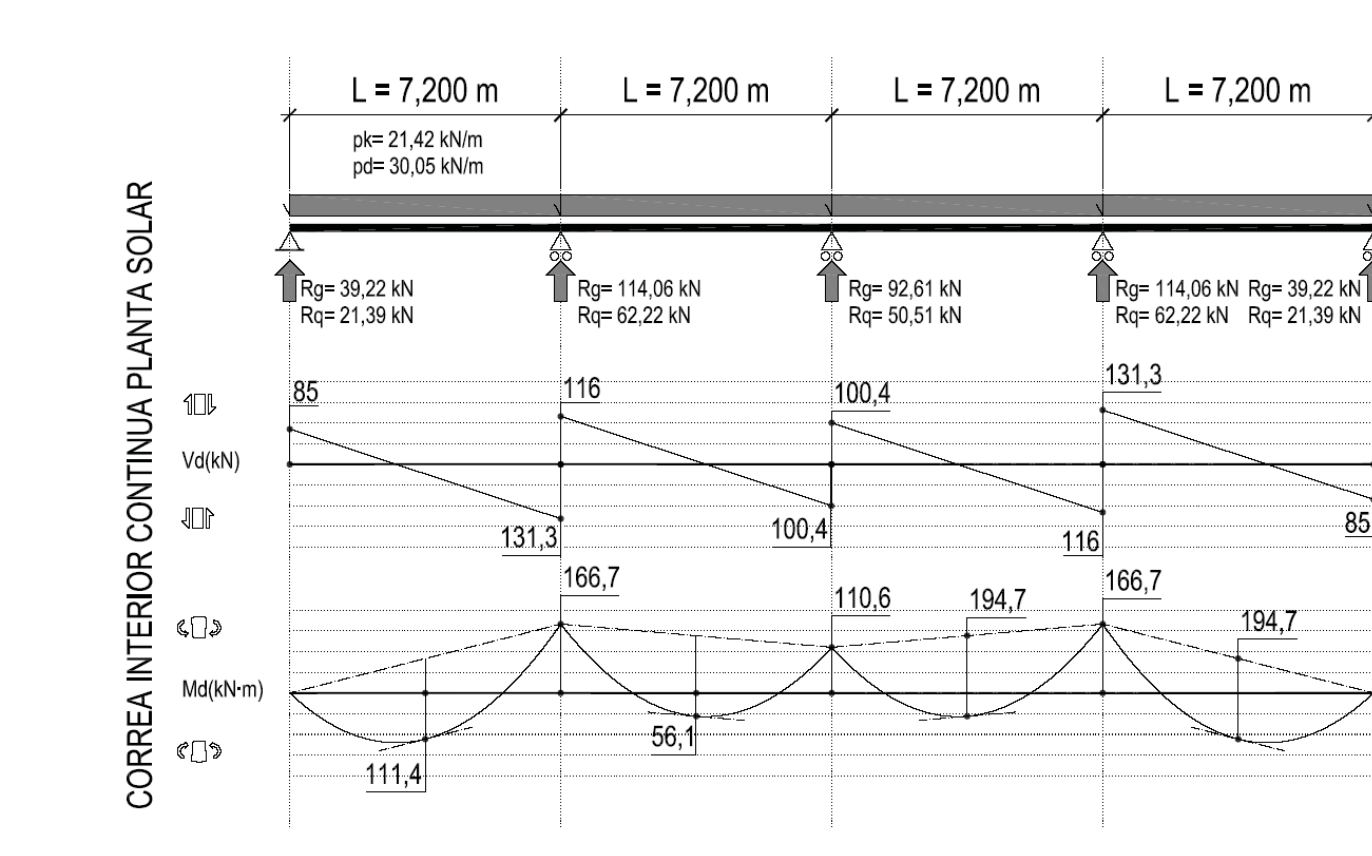
L = 7,200 m

pk = 21,42 kN/m
pd = 30,05 kN/m

Rg= 49,90 kN Rq= 27,22 kN
Rg= 49,90 kN Rq= 27,22 kN

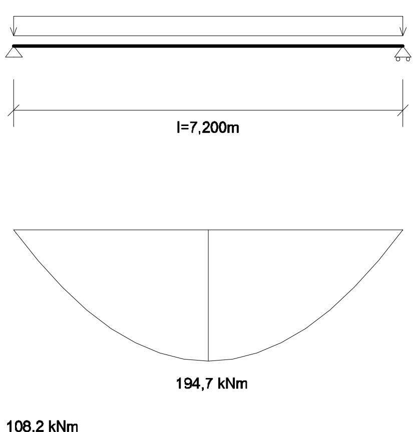
Vd(kN): 108,2; 108,2

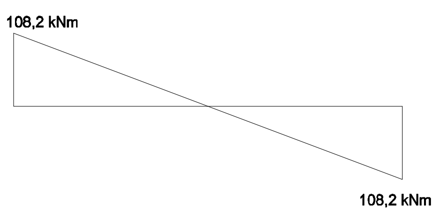
Md(kN·m): 194,7



1-Correa interior biapoyada, solución metálica con perfil laminado

$P_k = 21{,}42$ kN/m
$P_d = 30{,}05$ kN/m
$\gamma = 30{,}05 / 21{,}42 = 1{,}40$
$f_y = 275$ N/mm^2
$f_{yd} = \frac{275}{1{,}05} = 261{,}9\ \text{N/mm}^2$
$\tau_{yd} = \frac{275}{1{,}05 \times \sqrt{3}} 151{,}2\ \text{N/mm}^2$





1.1. Flexión:

$$W_{nec} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = \frac{194{,}7 \times 100}{27{,}5 / 1{,}05} = 743{,}99\ \text{cm}^3$$

IPE-330 $W_{pl} = 804{,}3$ cm^3 > $743{,}99$ cm^3
$A_{vz} = 30{,}81$ cm^2
$I_y = 11770$ cm^4
$EI = 24717$ kNm^2

El perfil es clase 1 en flexión

1.2. Cortante:

$A_{vz} = 30{,}81$ cm^2

$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_{yd}}{\sqrt{3}} = 30{,}81 \times 15{,}12 = 465{,}9$ kN
(6.4, CTE-SE-A)

$V_{Ed} < 0{,}5 V_{pl,Rd} = 232{,}9$ kN, no hay posibilidad de interacción. Debido a las condiciones de extremo y el caso de carga, es difícil que haya interacción entre momento y cortante, puesto que los puntos de momento máximo y cortante máximo no coinciden en la misma sección.

1.3. Flecha:

Combinación de carga:
0-Característica tras puesta en obra: $G_{1k} + Q_k \leq L/400$
2-Casi permanente (ψ=0,6): $G_k + \psi_2 Q_k \leq L/300$

Podemos calcular el porcentaje de carga que supone cada combinación:

$G_0 = 3,50$
$G_1 = 2,00$
$Q = 3,00$
$\Sigma Q = 8,50$

$$\frac{G_{1k} + Q_k}{\Sigma Q} = \frac{2+3}{8,5} = 0,588$$

$$\frac{G_k + \psi Q_k}{\Sigma Q} = \frac{5,5 + 0,6 + 3,0}{8,5} = 0,859$$

0- $G_{1k} + Q_k = 21,42 \times 0,588 = 12,60$ kN/m
2- $G_k + \psi_2 Q_k = 21,42 \times 0,859 = 18,40$ kN/m

$$\delta = \frac{5ql^4}{384EI}$$

Combinación 0: $\delta_0 = 0,018$ m $\approx L / 403 < L / 400$, cumple
Combinación 2: $\delta_2 = 0,026$ m $\approx L / 276 > L / 300$, no cumple. Se podría resolver dando contraflecha, pero tratándose de correas no interesa.

Necesitamos por flecha un perfil mayor. Calculamos la inercia necesaria:

$$I_{nec} = \frac{11770 \times 300}{276} = 12793 \text{ cm}^4 \longrightarrow \text{IPE-360}$$

El IPE-360 tiene una $I = 16270$ cm^4, entonces:

$\delta_2 = 0,019 \approx L / 383 < L / 300$ SI CUMPLE

1.4 Abolladura por cortante:

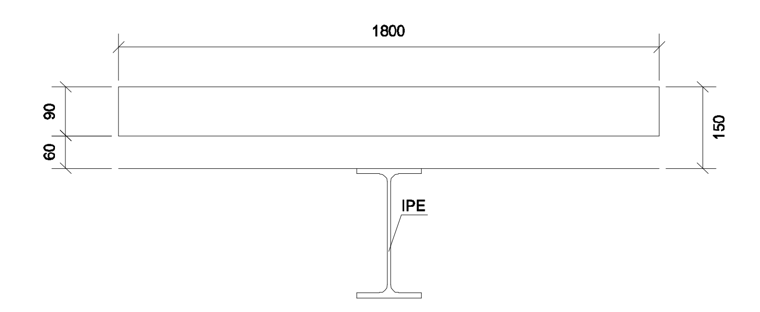
$$\frac{d}{t} = \frac{360 - 2 \times 12,7 - 2 \times 18,0}{8,0} = 37,3 \ll 60\varepsilon = 55,46 \qquad \text{(EC3)},$$

Siendo $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 0,924$

El CTE-SE-A indica 70ε pero no es correcto. El EC3 indica 60ε.

Para evitar el pandeo lateral es necesario que el perfil esté unido al forjado superior cada $40i_{min} = 151,6$ cm. En caso contrario es preciso realizar la comprobación.

2- Correa interior biapoyada, solución mixta con perfil laminado.



M_{Ed} = 194,7 kNm
V_{Ed} = 108,2 kN

Debido a las condiciones de extremo y el caso de carga, es difícil que haya interacción entre momento y cortante, puesto que los puntos de momento máximo y cortante máximo no coinciden en la misma sección.

En primer lugar tenemos que definir la sección, para ello determinamos el ancho efectivo:

$b_{eff} = b_0 + \Sigma b_{ei}$ (EC4, 5.4.1.2, (5.3))

$b_0 \approx 0$, el valor de b_0 suele tomarse simplificadamente igual a 0, al no resultar muy significativo.

$$\sum b_{ei} = 2\frac{L_e}{8} = 1{,}800 \text{ m}$$

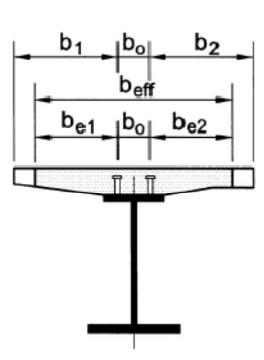


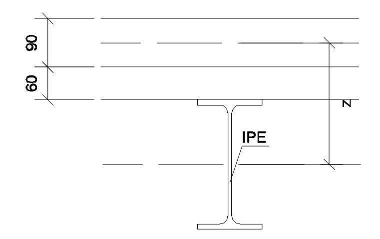
Figura 5.1.EC4

b_{eff} = 1,800 m.

2.1. Flexión-Régimen plástico:

Para dimensionar el perfil partimos de lo que resiste la capa de compresión:

$N_{c,Rd,tot}$ = 1,800 × 0,09 × 0,85 × 16667 = 2295 kN



Mientras el axil resistido por el perfil sea < 2295 kN la fibra neutra estará en la capa de compresión. Considerando que la fibra neutra estuviera justo por debajo del hormigón, obtendríamos los siguientes valores para distintos perfiles:

	A (cm2)	$N_{a,Rd}$=Af_{yd}	Z ≈ h/2 + 0,105	$M_{pl,Rd} \approx zN_{a,Rd}$
IPE-360	72,7	1905	0,285	542,9
IPE-330	62,61	1640	0,270	442,7
IPE-300	53,81	1409	0,255	359,7
IPE-270	45,95	1203	0,240	288,8
IPE-240	39,12	1025	0,225	230,5
IPE-220	33,37	874	0,215	187,9

Con el cálculo aproximado el perfil IPE-220 no cumple por muy poco a flexión. Vamos a calcular lo que resiste exactamente calculando cuánto hormigón trabaja en realidad:

$N_{a,Rd}$ = 874 kNm $\longrightarrow x_c = \frac{874}{1,800 \times 0,85 \times 16667} = 0,034$ m

Calculamos el brazo de palanca exacto:

$z = 0,37 - \frac{0,22}{2} - \frac{0,034}{2} = 0,243$ m

$h_{tot} = 0,15 + 0,22 = 0,37$

El momento resistido será:

$M_{pl,Rd} = 874 \times 0,243 = 212,38 > 194,7$ kNm, con el cálculo exacto, el perfil IPE-220 es suficiente.

2.2. Cortante:

$V_{pl,Rd}$ = 228,7 kN
V_{Ed} = 108,2 < 114,7 kN, no hay interacción.

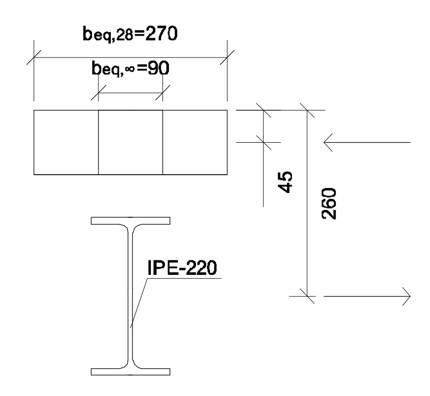
2.3. Flecha:

Hemos supuesto que la construcción es apeada.

El cálculo es igual que como viga metálica, excepto que la rigidez para el cálculo de la flecha permanente es la EI_∞ (fluencia).

Rigidez de la sección:
$n_{el,28} = 6,67 \longrightarrow b_{eq,28} = 1,80 / 6,67 = 0,270$m = 27 cm

$n_{el,\infty} = 3 \times 6,67 = 20 \longrightarrow b_{eq,\infty} = 1,80 / 20 = 0,09\text{m} = 9 \text{ cm}$



-Cálculo a 28 días:

$A = A_c + A_a = 27 \times 9 + 33,37 = 276,37 \text{ cm}^2$

$$z_{cdg} = \frac{243 \times 4,5 + 33,37 \times 26,0}{276,37} = \frac{1961,12}{276,37} = 7,10 \text{ cm}$$

$$I_c^{28} = \frac{27 \times 9^3}{12} = 1640,25 \text{ cm}^4$$

$I_a = 2772 \text{ cm}^4$

$I_{tot}^{28} = 1640,25 + 2772 + 243(4,5 - 7,10)^2 + 33,37(26,0 - 7,10)^2 = 17975 \text{ cm}^4$

$EI_{tot}^{28} = 37748 \text{ kNm}^2$

-Cálculo a tiempo infinito:

$A = 9 \times 9 + 33,37 = 114,37$ cm2

$$z_{cdg} = \frac{81 \times 4,5 + 33,37 \times 26}{114,37} = 10,77 \text{ cm}$$

$$I_c^{\infty} = \frac{9 \times 9^3}{12} = 546,75 \text{ cm}^4$$

$I_a = 2772 \text{ cm}^4$

$I_{tot}^{\infty} = 546,75 + 2772 + 81,0\,(4,50 - 10,77)^2 + 33,37(10,77 - 26,0)^2 = 14243 \text{ cm}^4$

$EI_{tot}^{\infty} = 29911 \text{ kNm}^2$

$\frac{G_0}{\sum Q} = 0,412$ (Parte del total de cargas correspondiente a G_0)

$\frac{G_1}{\sum Q} = 0,235$ (Parte del total de cargas correspondientes a G_1)

$\frac{Q}{\sum Q} = 0,353$ (Parte total de cargas correspondientes a Q)

-Construcción **apeada**:

Flecha antes de elementos constructivos:

$$\delta_{g0} = \frac{G_0}{\Sigma Q} \times \frac{5 \times q_k \times l^4}{384 EI_{28}} = 0{,}412 \times \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}2^4}{384 \times EI_{28}} = 0{,}0082 \text{ m} \longrightarrow L / 4400$$

Flecha tras la construcción de elementos constructivos (activa)

$$\delta_0 = \frac{5 \times q_k \times l^4}{384 EI_\infty} - \delta_{g0} = 1{,}0 \times \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}2^4}{384 EI_\infty} - 0{,}0082 = 0{,}0169 \text{ m} \longrightarrow L / 426 < L / 400,$$

cumple

Flecha casi-permanente

$$\delta_2 = \frac{G_k + \psi Q_k}{\Sigma Q} \times \frac{5 \times q_k \times l^4}{384 EI_\infty} = 0{,}859 \times \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}2^4}{384 EI_\infty} = 0{,}0215 \text{ m} \longrightarrow L / 334 < L / 300,$$

cumple

-Comparativa de costes entre la solución metálica y la mixta:

Costes de la pieza metálica (2€/kg):

IPE-360: 57,10 kg/ml = 114,5 € /ml

IPE-220: 26,20 kg/ml = 52,4 €/ml

Conectores aproximadamente a 2€ la unidad × 5 unidades = 10,0 €/ml

Esto supone un ahorro de aproximadamente un 55%.

-Construcción **no apeada**:
(En este caso las tensiones en la sección también cambian respecto a la solución no apeada)

$$\delta_{g0} = \frac{G_0}{\Sigma Q} \times \frac{5 \times q_k \times l^4}{384 EI_a} = 0{,}053 \text{ m} \longrightarrow L / 135$$

EI_a=5821 kNm^2 (En la fase inicial consideramos la inercia de la sección metálica).

La flecha debida al peso propio de la estructura ya es inadmisible. Podemos considerar como aceptable un valor de L / 300, pero teniendo en cuenta que es un límite inferior, y que si se cumpliera estrictamente, la pieza sería inadmisible, ya que esta flecha se suma a la producida por G1 ψQ_k para la flecha total, por lo que ésta última superaría L / 300.

$$EI_{min} = \frac{300}{135} \times 5821 = 12935 \text{ kNm}^2 \longrightarrow I \geq 6160 \text{ cm}^4, \text{ IPE-300}$$

Calculamos de nuevo para un IPE-300:

EI_a = 17548 kNm^2
EI_{28} = 78612 kNm^2

$EI_\infty = 61117$ kNm^2

Flecha por peso propio:

$$\delta_{g0} = \frac{G_0}{\Sigma Q} \times \frac{5 \times q_k \times l^4}{384 \times EI_a} = 0{,}0176 \text{ m} \longrightarrow \text{L/409, cumple}$$

Tras la construcción de los elementos constructivos (característica):

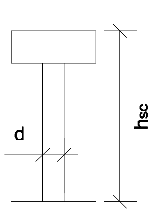
$$\delta_0 = 0{,}588 \times \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}20^4}{384 EI_\infty} = 0{,}0072 \text{ m} \longrightarrow \text{L/998, cumple}$$

Flecha casi-permanente:

$$\delta_2 = \delta_{g0} + (0{,}235 + 0{,}60 \times 0{,}353) \times \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}20^4}{384 EI_\infty} = 0{,}023 \text{ m} \longrightarrow \text{L/312, cumple}$$

2.4. Cálculo de la conexión, resistencia de los pernos:

Pernos h ≥ 60 + 50 = 110 ⟶ 125 mm
Resistencia del perno



$f_y = 350$ MPa
$f_u = 450$ Mpa

La resistencia del conector P_{Rd} será la mínima de:

$$P_{Rd} = \frac{0{,}8 f_u \pi d^2 / 4}{\gamma_v} = \frac{0{,}8 \times 450 \times 3{,}14}{4 \times 1{,}25} \times d^2 = 226{,}2 d^2 \qquad \text{(EC4, 6.6.3.1, (6.18))}$$

$$P_{Rd} = \frac{0{,}29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} = \frac{0{,}29 \times 1{,}0 \times d^2 \times \sqrt{25 \times 31000}}{1{,}25} = 205 d^2 \qquad \text{(EC4, 6.6.3.1, (6.19))}$$

$\gamma_v = 1{,}25$
$f_{ck} = 25$ N / mm^2
$E_{cm} = 31000$ N / mm^2
α depende de h_{sc} (altura del conector) y d (diámetro).

$\alpha = 1$ para $h_{sc} / d > 4$ (EC4, 6.6.3.1, (6.21))

Ø 16 ⟶ $\frac{h_{sc}}{d} = 7{,}8 > 4$ α=1

Ø 19 ⟶ $\frac{h_{sc}}{d} = 6{,}58 > 4$ α=1

Ø 22 ⟶ $\frac{h_{sc}}{d} = 5{,}68 > 4$ α=1

Ø 25 ⟶ $\frac{h_{sc}}{d} = 5 > 4$ α=1

	P_{Rd}
Ø16	52,7
Ø19	74,3
Ø22	99,6
Ø25	128,6

El Eurocódigo 4 establece un límite de 16 a 25mm para los conectores soldados si se pretende que sean dúctiles. Por otro lado, para su uso con chapa colaborante soldando a través de la misma, el diámetro máximo admisible es de 20mm. Si se sueldan al perfil directamente mediante taladros en la chapa pueden emplearse diámetros hasta 22mm.

Reducción de la capacidad por conexión a través de chapa:

$$K_t = \frac{0{,}7}{\sqrt{n_r}} \times \frac{b_0}{h_p} \times \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1\right) \qquad \text{(EC4, 6.6.3.1, (6.21))}$$

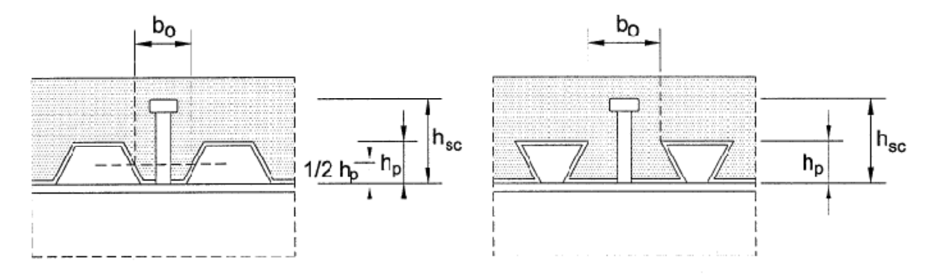


Figura 6.13. EC4

Con chapa Haircol 59 h_p=59-60 mm
Separación de conectores 205 mm. b_0=90mm

$$K_t = \frac{0{,}7}{\sqrt{1}} \times \frac{90}{59} \times \left(\frac{125}{59} - 1\right) = 1{,}19$$

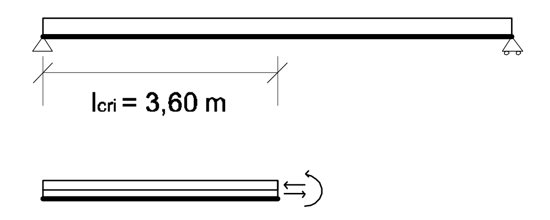
Pero con un límite:

Number of stud connectors per rib	Thickness t of sheet (mm)	Studs not exceeding 20 mm in diameter and welded through profiled steel sheeting	Profiled sheeting with holes and studs 19 mm or 22mm in diameter
$n_r = 1$	≤ 1,0	0,85	0,75
	> 1,0	1,0	0,75
$n_r = 2$	≤ 1,0	0,70	0,60
	> 1,0	0,8	0,60

Tabla 6.2. EC4. Valores máximos para el factor reductor k_t

El límite para un conector por nervio, espesor de la chapa igual o menor a 1 mm y conectores de diámetro igual o inferior a 20 mm soldados a través de la placa es K_t = 0,85.

2.5 Cálculo de la conexión. Rasante:



-Construcción **no apeada (IPE-300)**

$V_{l,d}$ = min,

$A_a f_{yd}$ = 1409kN

$A_c \times 0{,}85 f_{cd}$ = 2295 kN

Si colocamos un conector por onda:

V_{Rd} = nº conectores × P_{Rd} = 3,60 / 0,205 × P_{Rd} = 17P_{Rd} ≥ 1409 kN

$P_{Rd,min}$ = 82kN ⟶ Ø22 ($P_{Rd} \times 0{,}85$ = 84,7 kN)

Entonces Ø22 × 125: 1 conector por onda.

-Armadura de rasante:

$$\frac{A_{sf} f_y}{s_f} > \nu_{Ed} h_f \,/\, \cot\theta \qquad \text{(EC4, 6.6.6.4, (6.25))}$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{2\left(\frac{\text{Ø}^2 \pi}{4}\right)}{s_f}, \text{ dos barras por corte}$$

$f_{yd} \leq 400$ MPa

Parece lógico que s_f sea igual a la distancia entres ondas, que es 0,205 m.

Para θ = 45º:

$$\nu_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \Delta x} \longrightarrow \nu_{Ed} h_f = \frac{\Delta F_d}{\Delta x} = \frac{1409}{3{,}6} = 391{,}39 \text{ kN/m}$$

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} \geq 391{,}39 \text{ kN/m} \longrightarrow A_{sf} \geq \frac{391{,}39}{0{,}40} \times 0{,}205 = 200 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Ø}} = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}^2 \longrightarrow 1 \text{ Ø } 12/0{,}205 \text{ m}$$

-Construcción **apeada (IPE-220)**

$V_{l,d}$ = min,

$A_a f_{yd}$ = 874kN

$A_c \times 0{,}85 f_{cd}$ = 2295 kN

Si colocamos un conector por onda:

V_{Rd} = nº conectores × P_{Rd} = 3,60 / 0,205 × P_{Rd} = 17P_{Rd} ≥ 874 kN

$P_{Rd,min} = 51$ kN $\longrightarrow$ Ø19 ($P_{Rd} \times 0{,}85 = 63{,}1$ kN)

Entonces Ø19 × 125: 1 conector por onda.

-Armadura de rasante:

Resistencia del hormigón:

$\nu_{Ed} < \nu_{fcd} = 0{,}5\ f_{cd} = 8334$ kN

$$\nu_{Ed} = \frac{V_{ld}}{2\ \text{alas} \times 3{,}60 \times 0{,}09} = 1349\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{A_{sf} f_y}{s_f} > \nu_{Ed} h_f = 121{,}39\ \text{kN/m} \longrightarrow A_{sf} \geq \frac{121{,}39}{0{,}40} \times 0{,}205 = 62{,}2\ \text{mm}^2$$

$$\frac{A_{sf}}{s_f} = \frac{2\left(\frac{Ø^2\pi}{4}\right)}{s_f}, \text{ dos barras por corte}$$

$$A_Ø = \frac{62{,}2}{2} = 31{,}1\ \text{mm}^2 \longrightarrow 1\ Ø\ 10\ /\ 0{,}205\ \text{m}$$

2.6. Vibraciones:

$EI_\infty = 31479$ kNm^2

$$f_1 = \frac{9{,}87}{2\pi} \times \sqrt{\frac{31479 \times 10^3\ \text{Nm}^2}{1840\ \text{kg / m} \times 7{,}20^4\ \text{m}^4}} = 3{,}96\ \text{s}^{-1} = 3{,}96\ \text{Hz}$$

La m es el valor de la carga casi permanente: $g_0+g_1+\psi_2 q$

m_v es la masa por unidad de longitud en la viga, y m_f la masa por unidad de superficie.

$m_v = 21{,}42\ \text{kN/m} \times 0{,}8588 = 18{,}4\ \text{kN/m} = 1840\ \text{kg/m}$

Cálculo de la aceleración máxima:

$$a_0 = 0{,}9 \times \frac{2\pi f_1 I}{M} = 0{,}9 \times \frac{2\pi \times 3{,}96 \times 671\ \frac{1}{s}\text{Ns}}{8876\ \text{kg}} = 0{,}169\ \text{m/s}^2 = 0{,}017\text{g}$$

(CTE-SE-A, 7.2.2.3 (7.3))

I=67 Ns (CTE-SE-A, 7.2.2.3, punto 2)

$M = 0{,}67 \times m_f bL = 0{,}67 \times 1840\ \text{kg/m} \times 7{,}20\ \text{m} = 8876\ \text{kg}$

(CTE-SE-A, 7.2.2.3 (7.4))

a_0=1,72%g

Como correa biapoyada es aceptable.

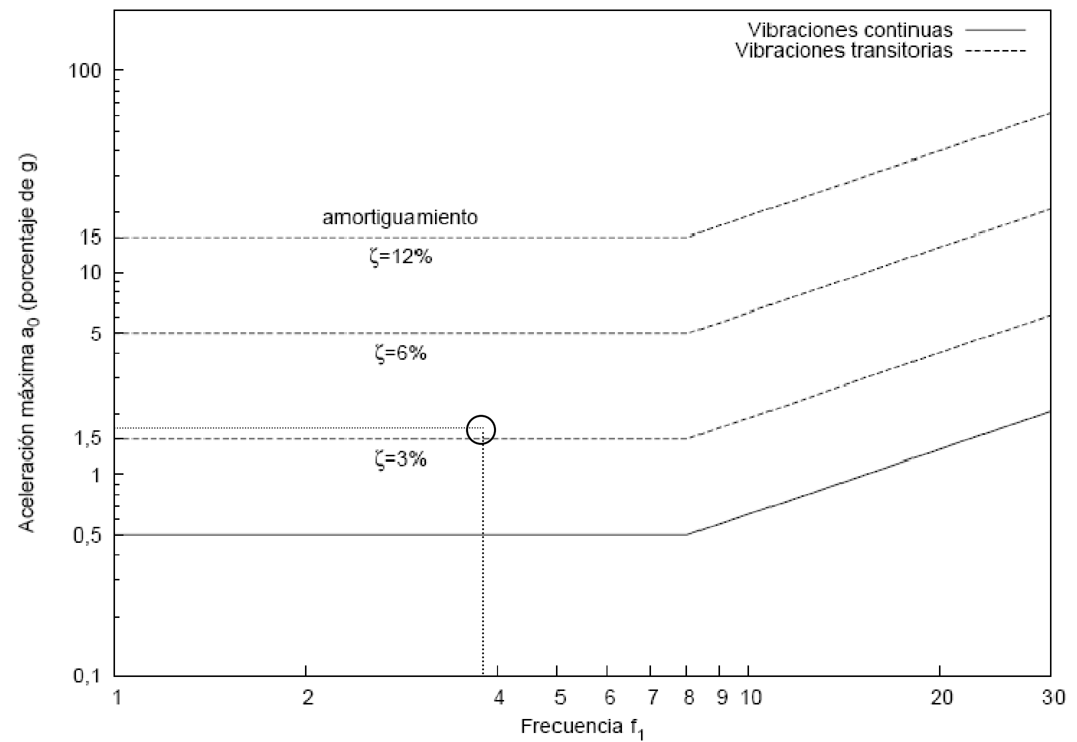
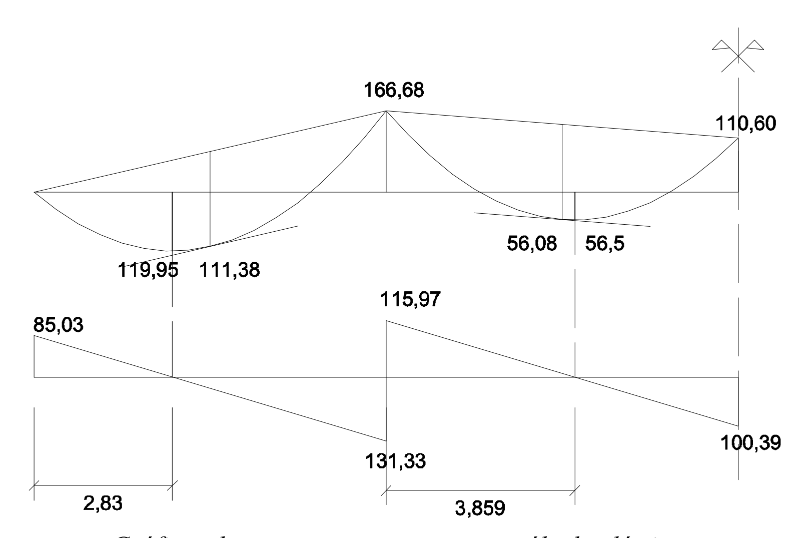


Figura 7.1. CTE-SE-A. Límites de aceptación, basadas en la percepción humana de las vibraciones de los forjados de edificación

3-Correa continua interior, solución metálica con perfil laminado:



Gráficas de momentos y cortantes en cálculo elástico

3.1. Flexión. Régimen elástico:

M_{Ed} = 166,7 kNm W_{nec} = 636,5 cm3 IPE-330

3.2. Cortante. Régimen elástico:

V_{Ed} = 131,3 kN < 0,5 $V_{pl,Rd}$ = 232,9 kN, no hay interacción

3.3. Flecha:

$$\delta_k = \frac{5ql^4}{384EI} - \frac{M_k l^2}{16EI} = \frac{5 \times 21{,}42 \times 7{,}2^4}{384} - \frac{118{,}83 \times 7{,}2^2}{16} = \frac{1}{24717} = 0{,}0147 \text{ m}$$

$$\gamma = \frac{30{,}05}{21{,}42} = 1{,}40$$

$$M_k = \frac{166{,}7}{1{,}40} = 118{,}83 \text{ kNm}$$

$\delta_0 = 0{,}588 \times 0{,}0147 = 0{,}0087$ m = L / 830 << L / 400, cumple
$\delta_2 = 0{,}859 \times 0{,}0147 = 0{,}0127$ m = L / 568 << L / 300, cumple

3.4. Flexión. Régimen plástico (igualando momentos positivos y negativos):

$M_{Ed} = 194{,}7 \times \frac{8}{11{,}67} = 133{,}47$ kNm $\longrightarrow$ W_{nec}=509,6 cm^3 $\longrightarrow$ IPE-300

3.5. Cortante. Régimen plástico:

$V_{Ed} = 108{,}2 + \frac{133{,}47}{7{,}20} = 126{,}74$ kN < $0{,}5V_{pl,Rd}$ = 194,2kN, no hay interacción.

La comprobación de flecha no cambia, ya que se realiza en régimen elástico. Únicamente cambia la inercia del perfil:

$$\delta_k = 0{,}0147 \times \frac{I_{IPE\text{-}330}}{I_{IPE\text{-}300}} = 0{,}0207 \text{ m}$$

$\delta_0 = \times 0{,}0207 = 0{,}0122$ m = L / 591 << L / 400, cumple

$\delta_2 = 0{,}859 \times 0{,}0207 = 0{,}0178$ m = L / 404 << L /300, cumple

3.6. Abolladura por cortante:

$\frac{d}{t} = 37{,}3 \ll 60\varepsilon = 55{,}46$, cumple (EC3)

La comprobación del pandeo lateral y aplastamiento del alma se realiza en la práctica E04.

4-Correa interior, solución mixta con perfil laminado:

Caben diversas opciones. Se puede realizar un análisis lineal y dimensionado elástico de la sección (las secciones deben ser al menos clase 3). Se puede realizar un análisis y dimensionado plástico de la sección (las secciones deben ser al menos clase 2). Otra opción es hacer un análisis plástico y dimensionado plástico de la sección (las secciones deben ser clase 1), y por último podemos partir del diagrama elástico no fisurado y realizar las redistribuciones permitidas por la norma (EC4).
-Cálculo de la sección eficaz:

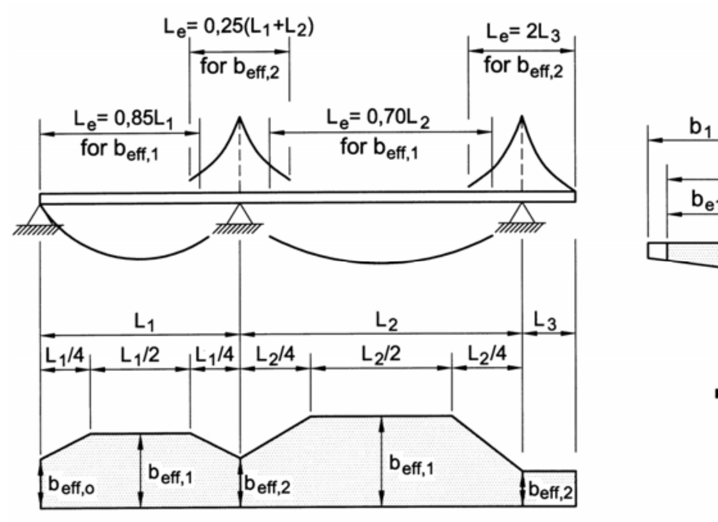


Figura 5.1. EC4

Cálculo del ancho efectivo en las distintas secciones:

1 2 3

1-2 2-3

$b_{ei} = \min\ (L_e / 8; b_i)$

Sección 1:

$b_{eff} = b_0 + \Sigma\beta b_{ei}$ (EC4, 5.4.1.2 (5.4))

$\beta = (0{,}55 + 0{,}025 \times \frac{L_e}{b_{ei}}) = 0{,}55 + 0{,}025 \times \frac{0{,}85 \times 7{,}20}{1{,}53} = 0{,}65$ (EC4, 5.4.1.2 (5.5))

$b_{eff} = \beta \times 1{,}53 = 0{,}9945$ m

Sección 1-2:

$b_{eff} = b_0 + \Sigma b_{ei}$ (EC4, 5.4.1.2 (5.3))

$$b_{eff} = \sum b_{ei} = 2\frac{L_e}{8} = 2 \times \frac{0{,}85 \times 7{,}20}{8} = 1{,}53 \text{ m}$$

Sección 2:

$$b_{eff} = \sum b_{ei} = 2\frac{L_e}{8} = 2 \times \frac{0{,}25 \times 7{,}20 \times 2}{8} = 0{,}90 \text{ m}$$

Sección 2-3:

$$b_{eff} = \sum b_{ei} = 2\frac{L_e}{8} = 2 \times \frac{0{,}70 \times 7{,}20}{8} = 1{,}26 \text{ m}$$

Sección 3:

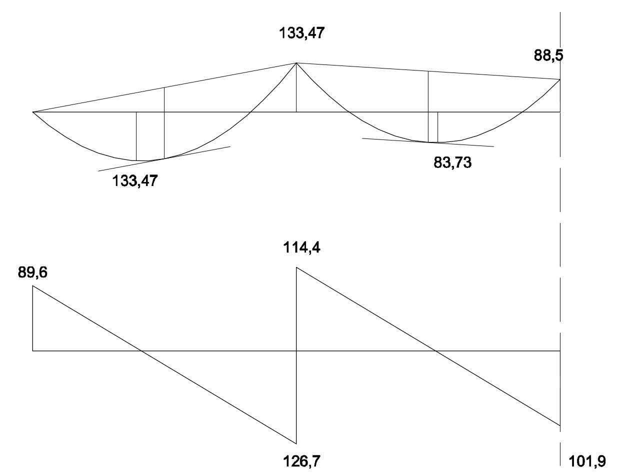
$$b_{eff} = \sum b_{ei} = 2\frac{L_e}{8} = 2 \times \frac{0{,}25 \times 7{,}20 \times 2}{8} = 0{,}90 \text{ m}$$

La L_e se obtiene de la figura 5.1 del Eurocódigo 4.

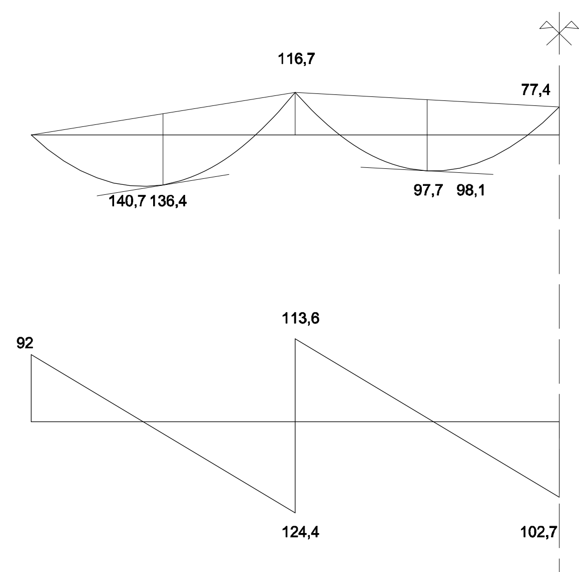
Diagrama de momentos:
Cuanto más se descuelgue el momento, más económica es la sección, si bien apartarse excesivamente de los valores elásticos puede conducir a incumplimientos de los valores de servicio.
Los límites son:

Class of cross-section in hogging moment region	1	2	3	4
For un-cracked analysis	40	30	20	10
For cracked analysis	25	15	10	0

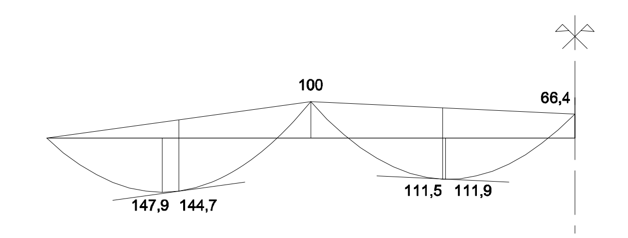
Tabla 5.1. EC4. Límites de la redistribución de momentos (en % del valor elástico inicial)



Gráfica de momentos y cortantes con una redistribución del 20%



Gráfica de momentos y cortantes con una redistribución del 30 %



Gráfica de momentos con una redistribución del 40 %

Sabemos que el IPE-220 mixto resiste aproximadamente 212 kNm. El IPE-220 tiene un alma a compresión clase 1. La sección mixta resultante será clase 1, admitiéndose una redistribución de hasta el 40% desde la elástica.
En perfiles mixtos siempre es conveniente por economía aumentar el momento positivo al máximo. Sin embargo hay que tener en cuenta que redistribuciones excesivas pueden dar lugar a Estados Límite de Servicio en plastificación, lo que en principio es inadecuado. Una redistribución de 1 a 1/1,41≈0,30, o un 30% es un límite adecuado.

4.1. Redistribución del 30%:

4.1.1. Flexión positiva:

Tramo 1-2: b_{eff} = 1,53 m
Tramo 2-3: b_{eff} = 1,26 m

	IPE-180	IPE-200	IPE-220	IPE-240
$M^{+}_{Rd,1\text{-}2}$	141,5	173,6	209,6	252,4
$M^{+}_{Rd,2\text{-}3}$	139,5	170,9	205,8	247,2
M_{ad}	43,6	57,8	74,7	96,0

Momentos elásticos:

$M_{2,k} \approx$ 166,7 / 1,40 = 118,8 kNm

Para **construcción apeada** un IPE-180 sería posible, aunque algo justo.

4.1.2. Cortante:

$A_v = A_{tot} - 2A_f$
$A_f = b_f \times t_f$

	IPE-180	IPE-200	IPE-220	IPE-240
$V_{pl,Rd}$	142,0	173,6	198,5	235,9
$0{,}5V_{pl,Rd}$	71,0	86,8	99,3	117,9
A_w	9,39	11,48	13,13	15,60
A_f	14,56	17,00	20,24	23,52

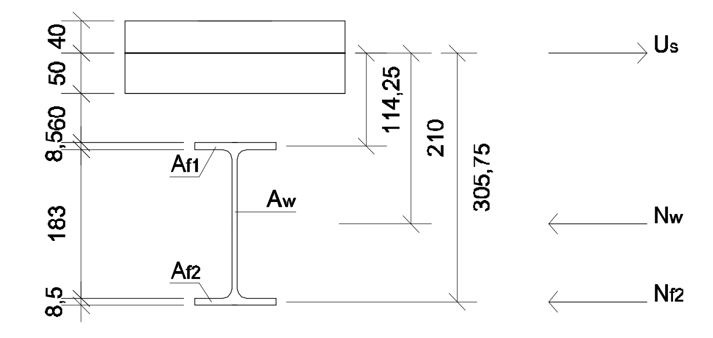
Con el perfil IPE-180 el dimensionado es muy justo. Es preferible tener holgura a momento y cortante para redistribuciones posteriores. Tomamos IPE-200, que permitiría redistribuir hasta el 40% en caso de ser procedente.

4.1.3. Flexión negativa con cortante:

Ved=124,4 kN

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{Rd}} - 1\right)^2 = 0{,}188$$

$$(1 - \rho) = 0{,}812 \longrightarrow (1 - \rho)f_y = 212{,}8 \text{ N / mm}^2$$



Aporte del ala inferior:

$A_{f2} = 8{,}5 \text{ cm}^2 \longrightarrow N_{f2} = 222{,}6 \text{ kN} \longrightarrow M_{Rd,f2} = 222{,}6 \times 0{,}306 = 68{,}06 \text{ kNm}$

Aporte del alma (interacción con cortante):

$A_w = 11{,}48 \text{ cm}^2 \longrightarrow N_w = 11{,}48(1 - \rho)f_y = 244{,}3 \text{ kN} \longrightarrow$
$M_{Rd,w} = 244{,}3 \times 0{,}21 = 51{,}3 \text{ kNm}$

$\sum M_{1,2} = 119{,}4 \text{ kNm} > 116{,}7 \text{ kNm}$
$U_{s,nec} = 222{,}6 + 244{,}3 = 466{,}9 \text{ kN} \longrightarrow$ 10Ø12

Si tenemos un mallazo de Ø8 / 20 = 109kN / m. En un ancho eficaz beff=0,90 m: $0{,}90 \times 109 = 98{,}3$ kN

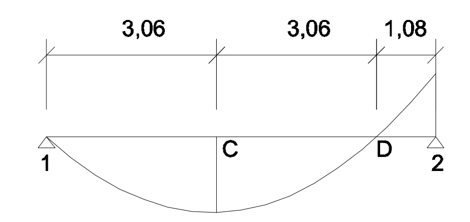
$U_{s,nec} = 466{,}9 - 98{,}3 = 368{,}6 \text{ kN} \longrightarrow$ 8Ø12

NOTA: si adoptáramos una redistribución del 40%, sería
$M_w = 100 - 68{,}06 = 31{,}9$ kNm
$N_w = 31{,}9 / 0{,}21 = 152 \text{ kN} < 244$ kN
$U_{s,nec} = 222{,}6 + 152 = 375 \text{ kN} \longrightarrow$ 8Ø12 ó 6Ø12 + #Ø8 / 20

Longitud de la armadura:
$2 \times 1{,}23 + 2 \times 0{,}45 + 2 \times 0{,}43 = 4{,}22$ m

La regla clásica de 0,30l daría una longitud de 4,32 m.

4.1.4. Cálculo de la conexión. Rasante:



Rasante 1C:

N_{ad} = 745,9 kN
$V_{l,Ed}$ = 745, 9 / 3,06 = 243,9 kN / m
Con un conector por onda:
$n_c^+ = 3{,}06 \,/\, 0{,}20 = 15$ uds
$P_{Ed} = 745{,}9 \,/\, 15 = 49{,}73$ kN / conector

Tenemos dos opciones:

1-Disponer un KÖCO Ø16x125 por onda
$P_{Rd} = 0{,}85 \times 52{,}7 = 44{,}8$ kN
$\eta=0{,}90>0{,}40$
$M^+_{Rd,conexión} = 57{,}8 + 0{,}90 \times (173{,}6 - 57{,}8) = 162{,}02 > 140{,}7$, cumple

2-Disponer conectores 19 × 125 cerca de los extremos y 16 × 125 en el centro

Rasante C2:

N_{Ed} = 745,9 + 466,9 = 1212,8 kN
Conectores n_c = 4,14 / 0,205 = 20 uds
P_{Ed} = 1212,8 / 20 = 60,6 kN / conector
1Ø19 × 125 por onda, unificamos a toda la viga.
Hay que tener en cuenta que con redistribución del 40% la conexión se reduciría.
N_{Ed} = 745,9 + 375 = 1120,9 kN
N_c = 4,06 / 0,205 = 19,8 ~ 19
P_{Ed} = 58,9 kN / conector ⟶ 1(19×25) por onda

También hay que mirar si:

$\frac{M^-_{pl,Rd}}{M_{a,Rd}} \leq 2{,}50$, si no cumple hay que mirar el tramo D2 y C2 separadamente.

$M^-_{pl,Rd}$ = 119,4 kNm
$M_{a,Rd}$ = 57,8 kNm

$\frac{M^-_{pl,Rd}}{M_{a,Rd}} = 2{,}07 < 2{,}50$, cumple

Nota: si se quisiera adecuar la conexión y optimizarla, puede hacerse conexión parcial. En este caso sólo puede hacerse a positivos, a negativos hay que conectar totalmente.

N_{sd} = 466,9 kN
n_c = 1,08 / 0,20 = 5,4 ~ 5 conectores
P_{Ed} = 93kN ⟶ 2 conectores Ø19 × 125 / onda

Con redistribución del 40% daría algo muy parecido. Es preferible hacer una conexión total en el tramo C2.

4.1.5. Flecha:

Para un IPE-200:

	b_{eff}=1350	b_{eff}=1290	b_{eff}=900
EI_{28}^{+}	29094	28148	
EI_{∞}^{+}	22830	21759	
EI^{-}			(8Ø12+Ø8/20) 11252 (4Ø12+Ø8/20) 8874
$EI_{a}^{+,-}$		4080	

-Cálculo aproximado con inercia "equivalente" (Branson)

Para una **construcción apeada**:

-Vano 1-2

$$EI_{eq28}^{12} \approx 0{,}85 \times 29094 + 0{,}15 \times 11252 = 26418 \text{ kNm}^2$$

$$EI_{eq\infty}^{12} \approx 0{,}85 \times 22830 + 0{,}15 \times 11252 = 21093 \text{ kNm}^2$$

Momento elástico sin mayorar:

M_k^2 = 118,8 kNm

M_k^3 = 118,8 kNm

$$\delta_{12} = \left(\frac{5ql^4}{384} - \frac{M_2 l^2}{16}\right) = 364{,}6\frac{1}{EI}$$

$$\delta_{23} = \delta_{12} - \frac{Ml^2}{16EI} = 109{,}3\frac{1}{EI}$$

$$\delta_{G0,28}^{12} = \frac{3{,}5}{8{,}5} \times \frac{364{,}6}{26418} = 0{,}0057 \text{ m} = 0{,}57 \text{ cm}$$

$$\delta_{\infty}^{12} = \frac{364{,}6}{21093} = 0{,}017 \text{ m} = 1{,}73 \text{ cm}$$

$\delta_0^{12} = \delta_\infty - \delta_{go,28}$ = 1,16 cm ⟶ L / 621 < L / 400, cumple

$\delta_2^{12} = 0{,}859 \times \frac{364{,}6}{21093} = 1{,}48$ cm $\longrightarrow$ L / 485 < L / 300, cumple

-Vano 2-3

$EI_{eq,28}^{23} \approx 0{,}70 \times 28148 + 0{,}15 \times 11252 + 0{,}15 \times 8874 = 22723 \text{ kNm}^2$

$EI_{eq,28}^{23} \approx 0{,}70 \times 21759 + 0{,}15 \times 11252 + 0{,}15 \times 8874 = 18250 \text{ kNm}^2$

$\delta_{go,28}^{23} = 0{,}20$ cm

$\delta_{\infty}^{23} = 0{,}60$ cm

$\delta_0^{23} = \delta^{\infty} - \delta_{g0,28} = 0{,}40$ cm $\longrightarrow$ L / 1796

$\delta_2^{23} = 0{,}859 \times \frac{109{,}3}{18250} = 0{,}51$ cm $\longrightarrow$ L / 1396

Para una **construcción no apeada**:

Flecha de montaje:

$\delta_{go}^{12} = \frac{3{,}5}{8{,}5} \times \frac{364{,}6}{EI_a} = 0{,}0037 \text{ m} = 3{,}67$ cm $\longrightarrow$ L / 196

$\delta_{\infty}^{12} = \frac{2+3}{8{,}5} \times \frac{364{,}6}{21093} = 1{,}02 + 3{,}67 = 4{,}69$ cm

Flecha activa

$\delta_0^{12} = 1{,}02$ cm $\longrightarrow$ L / 705, cumple

Flecha total casi permanente:

$\delta_2^{12} = 3{,}67 + \frac{2 + 0{,}6 \times 3}{8{,}5} \times \frac{364{,}6}{21093} = 3{,}67 + 0{,}77 = 4{,}44$ cm $\longrightarrow$ L / 162

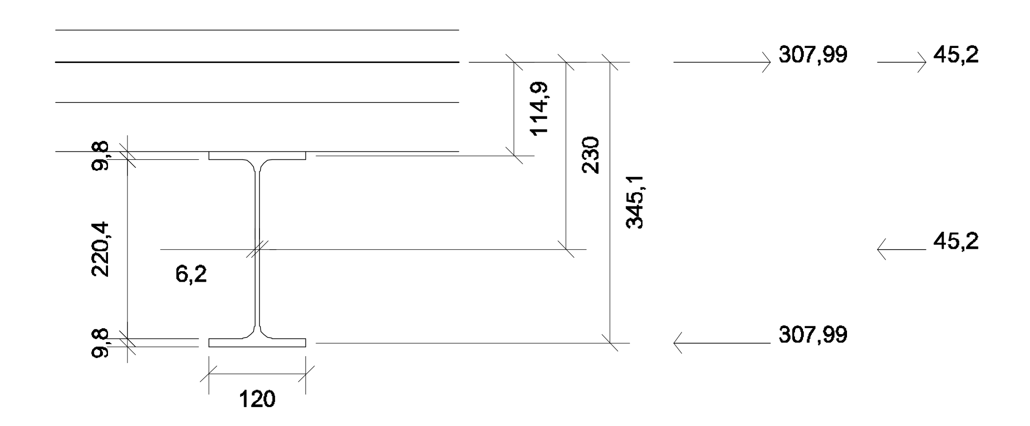
Hay que controlar la flecha total δ_2, para lo cual es esencial controlar la de montaje. Como mínimo hay que limitarla a L / 300 $\longrightarrow$ I_{nec}=2973 cm^4 $\longrightarrow$ IPE-240

Hay que repetir los cálculos para este perfil. La resistencia a momento positivo aumenta, y a momento negativo se precisa menos acero.

IPE-240:

Para calcular la armadura podemos utilizar un método simplificado, que no agotaría el perfil, pero que es seguro, o un método en el que se agota todo el perfil:

Procedimiento simplificado:

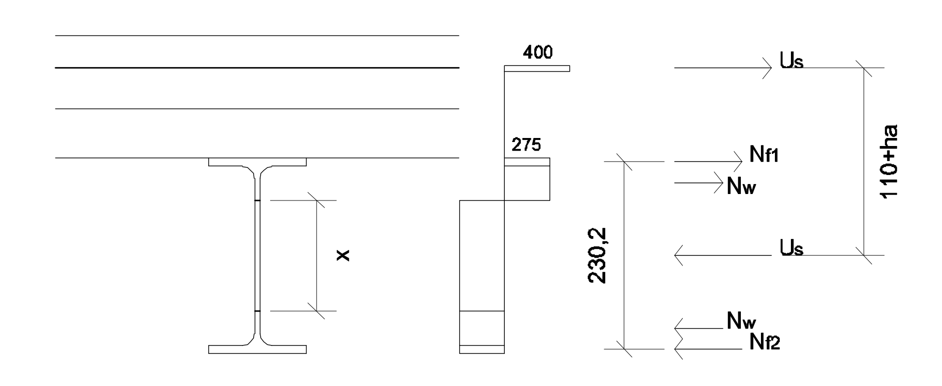


Momento del ala inferior: 307,99 × 0,345 = 106,3 kNm

Momento del alma: $\frac{116{,}7 - 106{,}3}{0{,}23} = 45{,}2$ kNm

$U_s = 307{,}99 + 45{,}2 = 353{,}2$ kN ⟶ 8Ø12

Procedimiento optimizado, agotando todo el perfil:



$M_f = N_{f1} \times (h - t_f)$
$U_s = x \times t_w \times f_y$

$M_s = U_s \times (110 + h_a)$

$M_w = t_w \times \frac{h_w^{\ 2}}{4} \times f_y - t_w \frac{x^2}{4} \times f_y$

$M_{Ed} = M_f + M_s + M_w$ ⟶ x = 77,05 mm

$U_{s,nec} = 125$ kN ⟶ Ø8 / 20 + 1Ø12

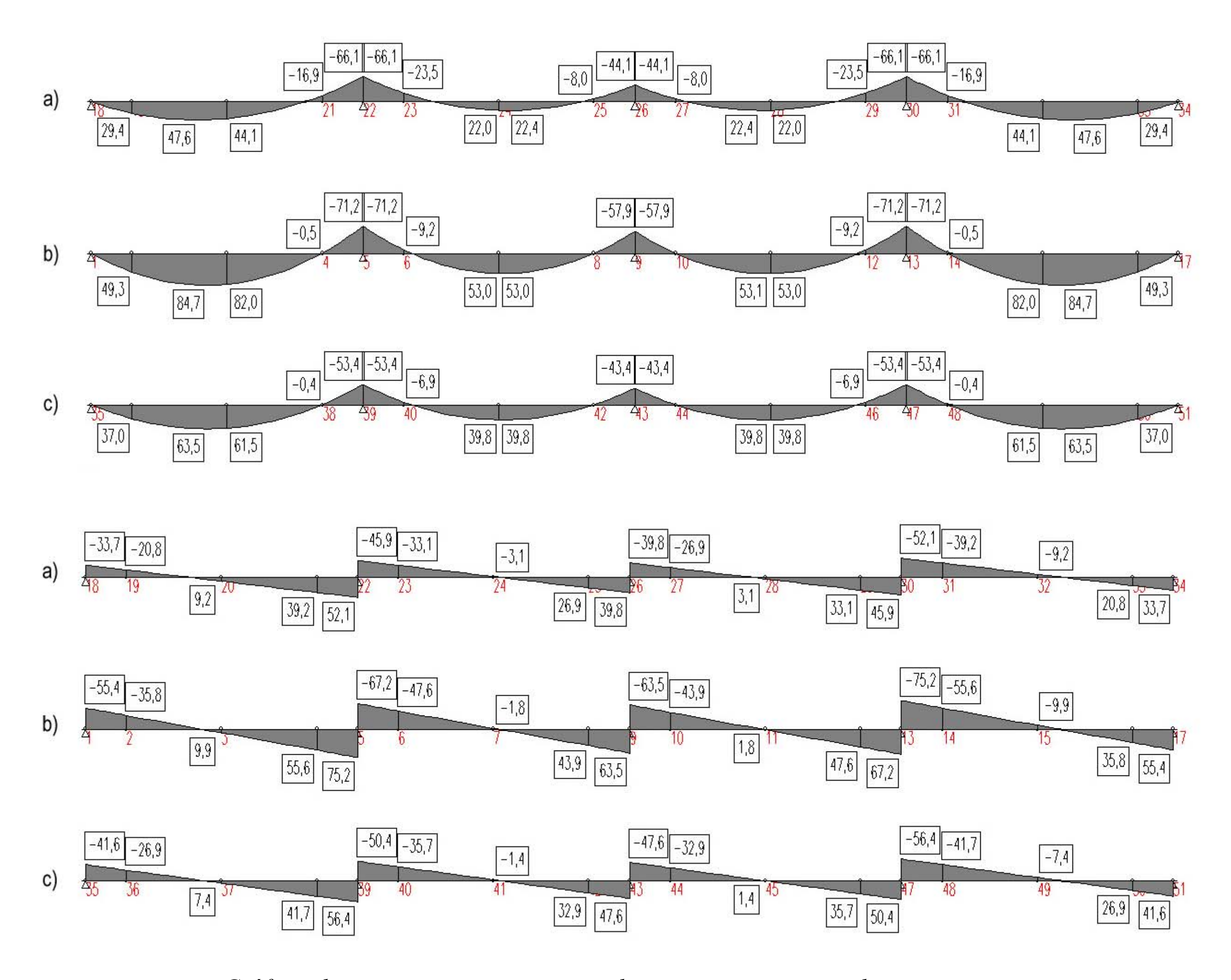
$V_{pl,Rd} = 235{,}9$ kN ⟶ $0{,}5V_{pl,Rd} = 117{,}9$ kN ⟶ $\rho_{21} = 0{,}003 \sim 0$

$M^{+}_{Rd,12} = 252{,}4$ kNm

$EI^{+}_{12,28} = 46064\ kNm^2$
$EI^{+}_{12,\infty} = 35659\ kNm^2$
$M^{+}_{Rd,23} = 247{,}4\ kNm$
$EI^{+}_{23,28} = 44598\ kNm^2$
$EI^{+}_{23,\infty} = 33831\ kNm^2$
$M_{a,Rd} = 96\ kNm$
$EI^{-}_{2} = 11112\ kNm^2$
$EI^{-}_{3} = 10023\ kNm^2$

	Vano 1-2	Vano 2-3
$EI_{eq,\infty}$	31977	26852
Flecha de montaje	1,84 (L/392)	0,55 (L/1310)
Flecha activa	0,62 (L/1153)	0,20 (L/3632)
Flecha total casi permanente	2,31 (L/312)	0,70 (L/1028)

-Cálculo con un modelo de barras de inercia variable:

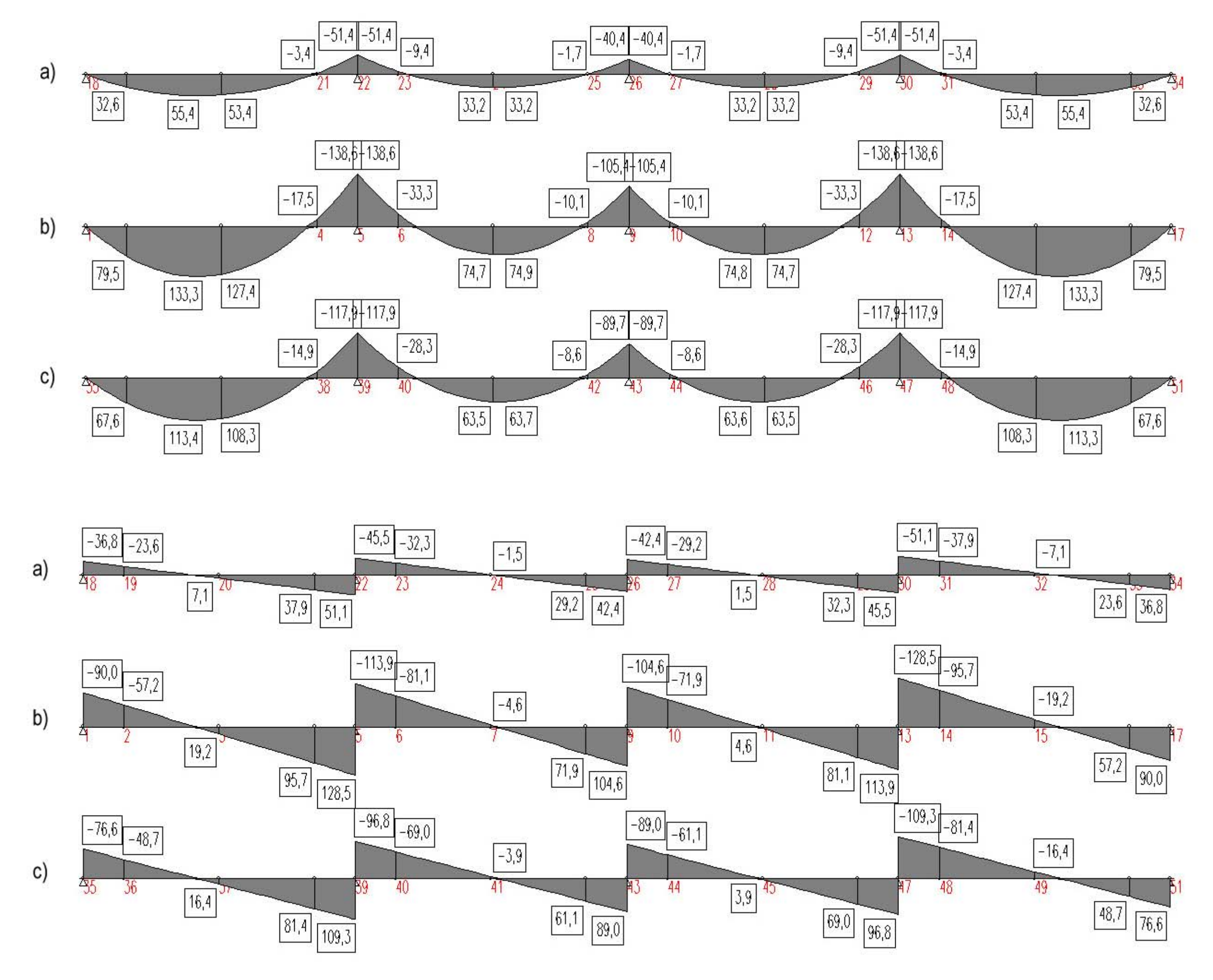


Gráficas de momentos y cortantes para la correa mixta no apeada.

a) En fase de montaje: carga g_o, EI_{28}

b) A 28 días: carga g_1+q, EI_{28}

c) Casi permanente: carga G+ψ2Q, EI_∞



Gráficas de momentos y cortantes para la correa mixta apeada.

a) *En fase de montaje: carga g_o, EI_{28}*
b) *A tiempo infinito: carga g_0+g_1+q, EI_∞*
c) *Casi permanente: carga $G+\psi 2Q$, EI_∞*

Obtenemos los valores de la flecha del programa:

	Flecha de montaje		Flecha activa		Flecha casi permanente	
	Branson	Modelo	Branson	Modelo	Branson	Modelo
1-2	1,84	1,871	0,62	0,790	2,31	2,47
2-3	0,55	0,550	0,20	0,410	0,70	0,862

Tabla resumen de flechas en construcción no apeada

	Flecha de montaje		Flecha activa		Flecha casi permanente	
	Branson	Modelo	Branson	Modelo	Branson	Modelo
1-2	0,57	0,667	1,16	1,263	1,48	1,660
2-3	0,20	0,315	0,40	0,521	0,51	0,719

Tabla resumen de flechas en construcción apeada

4.1.6. Fisuración y armado mínimo:

Tensión del acero en servicio:

$$\sigma_s \approx \frac{500}{1,15} \times \frac{1}{1,40} \times \frac{A_{s,nec}}{A_{s,real}} \approx 310 \text{ N / mm}^2$$

La fisura aceptable en ambiente interior es $w_k = 0,4$ mm
Diámetro máximo Ø12 ó separación máxima 150 mm.

Cuantía mínima absoluta:
Construcción apeada: 0,4% $A_c \equiv 0,4\%\ (900 \times 90) = 324$ mm^2 ⟶ Ø8 / 20 + 1Ø12

Construcción no apeada: 0,2% $A_c \equiv 0,2\%\ (900 \times 90) = 162$ mm^2 ⟶ Ø8 / 20, a disponer en una longitud de 0,25 L a cada lado del apoyo.

Cuantía mínima por cálculo:
$A_s = k_s \times k_c \times k \times f_{ct,eff} \times A_{ck} / \sigma_s$

$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,6$ N / mm^2
$k = 0,80$
$k_s = 0,90$

$$k_c = \frac{1}{1 + h_c / (2z_0)} + 0,3 \leq 1$$

$h_c = 90$ mm

Para el IPE-240:

$z_0 = 8,63 - 4,5 = 4,13$ cm
$A_{ct} = 900 \times 90 = 81000$ mm^2

$$k_c = \frac{1}{1 + 90 / (2 \times 41,3)} + 0,3 = 0,78$$

$A_s = 380$ mm^2 ⟶ Ø8 / 20 + 2Ø12

Para el IPE-200:

$z_0 = 7,38 - 4,5 = 2,88$ cm

$$k_c = \frac{1}{1 + 90 / (2 \times 28,8)} + 0,3 = 0,69$$

$A_s = 338$ mm^2 ⟶ Ø8 / 20 + 1Ø12

Objetivo del ejercicio

Dimensionar piezas a flexión simple y celosías.

Enunciado

Sobre el dimensionado realizado en la práctica E03 calcular las propiedades de rigidez de las secciones dadas y verificar las deformaciones modificando, si es preciso, el dimensionado.

Dimensionar la celosía de cubierta teniendo en cuenta el pandeo.

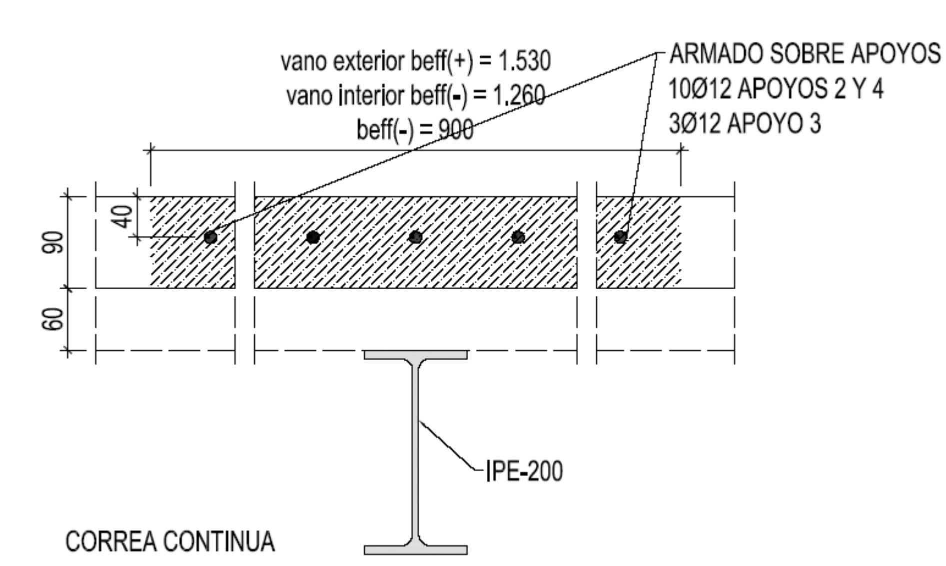
1. Flecha de la correa interior mixta IPE-220 biapoyada. Construcción no apeada. Según los resultados proponer si es preciso una sección alternativa.
2. Flecha del vano extremo de la correa mixta continua interior. Construcción apeada.
   2.1. Valor de flecha considerando un perfil de inercia constante equivalente.
   2.2. Valor de flecha realizando un análisis fisurado.
3. Análisis y dimensionado de la celosía de cubierta considerando las cargas indicadas y el pandeo de las piezas.

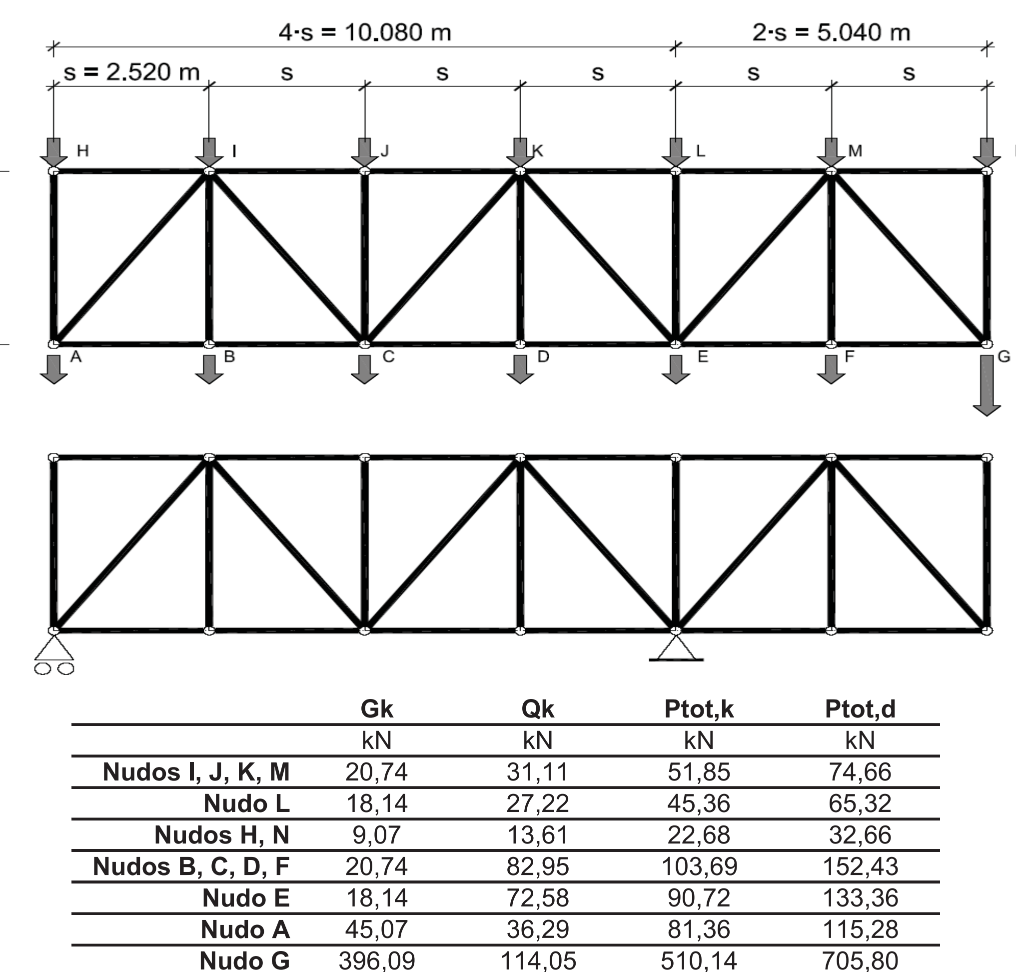
Para la celosía emplear perfiles HEB con el alma vertical. Suponer las plantas arriostradas perpendicularmente a las celosías.

Materiales: S27JR, HA-25, B500S.

Categoría de sobrecargas de uso C. Tabiquería convencional.

L = 7,200m; S = 2,520m; H = 4,040m.



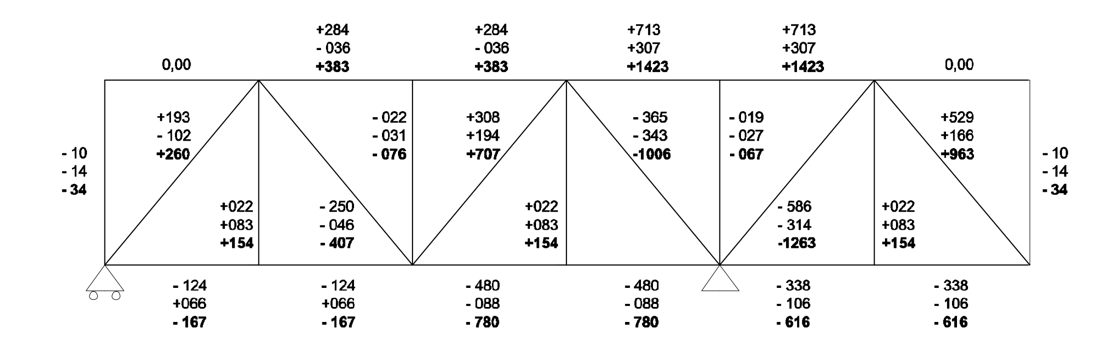


	Gk	Qk	Ptot,k	Ptot,d
	kN	kN	kN	kN
Nudos I, J, K, M	20,74	31,11	51,85	74,66
Nudo L	18,14	27,22	45,36	65,32
Nudos H, N	9,07	13,61	22,68	32,66
Nudos B, C, D, F	20,74	82,95	103,69	152,43
Nudo E	18,14	72,58	90,72	133,36
Nudo A	45,07	36,29	81,36	115,28
Nudo G	396,09	114,05	510,14	705,80

Los apartados 1 y 2 están realizados en el Ejercicio 3. Pasamos a resolver el apartado 3.

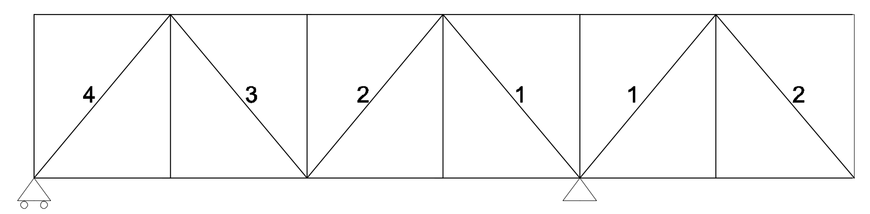
3. Análisis y dimensionado de la celosía de cubierta considerando las cargas indicadas y el pandeo de las piezas:

El cálculo manual de las barras más desfavorables está en el ejercicio E01. Para este ejercicio es preferible prescindir de alternancia de cargas.
Solicitaciones N_{kg}, N_{kq}, N_d (los valores positivos son de tracción y los negativos de compresión).



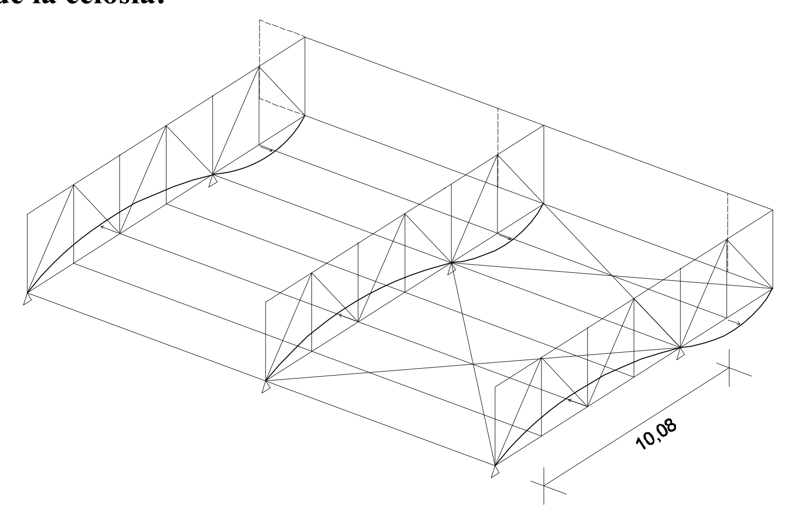
3.1-Predimensionado (sin pandeo)

	N_d	A_{nec} (cm^2)	Perfil
Cordón superior	+1423	54,3	HE180B (65,3)
Cordón inferior	-780	29,8	HE120B (34,0)
Diagonales 1	-1263	48,3	HE160B (54,3)
Diagonales 2	+963	36,8	HE140B (43,0)
Diagonales 3	-407	15,6	HE100B (26,0)
Diagonales 4	+260	9,9	HE100B (26,0)
Montantes	+154/-76	5,9	HE100B (26,0)

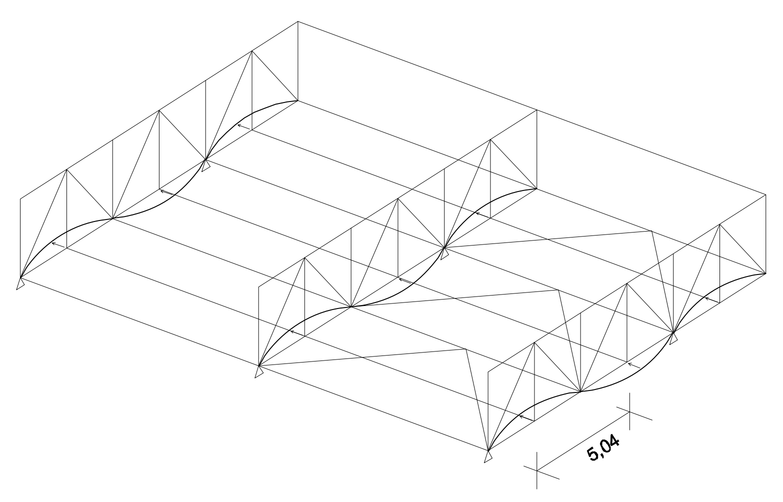


Agrupación de diagonales

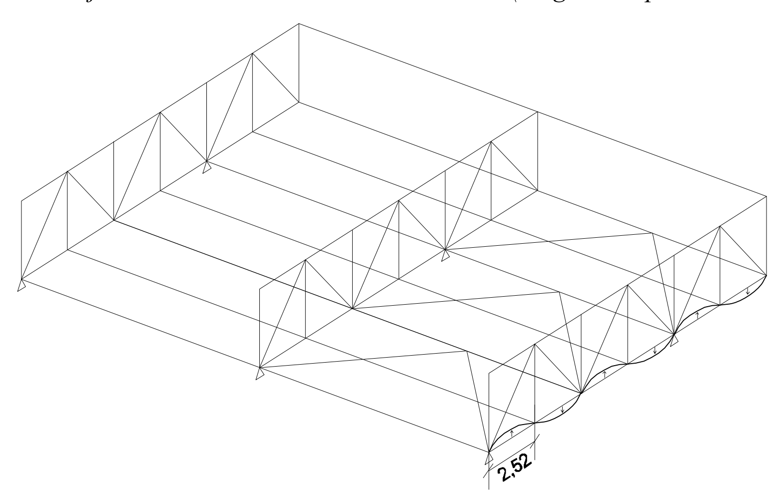
3.2-Pandeo de la celosía:



Opción 1: cada celosía debe resistir de manera independiente el pandeo



Opción 2: el conjunto está arriostrado horizontalmente (longitud de pandeo en el plano horizontal)



Longitud de pandeo en el plano vertical

Vamos a calcular el caso 1.

3.3-Cálculo de las diagonales 1, 3 y montantes (compresión)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \times EI$$

$L_k^{13} = \sqrt{2{,}52^2 + 3{,}03^2}$ =3,941 m
L_k^m = 3,03 m
N_{Ed}^1 = -1263 kN
N_{Ed}^3 = -407 kN
N_{Ed}^m = -76 kN

	A (cm^2)	i_{min}	λ	$\bar{\lambda}$	Curva	X	$N_{b,Rd}$
HEB-160	54,3	4,05	97	1,12	C	0,47	673<1263
HEB-180	65,3	4,57	86	0,99	C	0,54	930<1263
HEB-200	78,1	5,07	78	0,90	C	0,60	1233<1263
HEB-220	**91,0**	**5,59**	**70**	**0,81**	**C**	**0,65**	**1560>1263**
HEB-140	**43,0**	**3,58**	**110**	**1,27**	**C**	**0,40**	**453>407**
HEB-120	34,0	3,06	129	1,48	C	0,32	285<407
HEB-100	**26,0**	**2,53**	**119**	**1,38**	**C**	**0,36**	**243>76**

Diagonal 1 HEB-220
Diagonal 3 HEB-140
Montantes HEB-100

3.4-Cálculo del cordón inferior:

Esfuerzo axil variable (6.3.2.2, CTE-SE-A)
$N_{Ed} = N_{Ed, max}$ = -780 kN

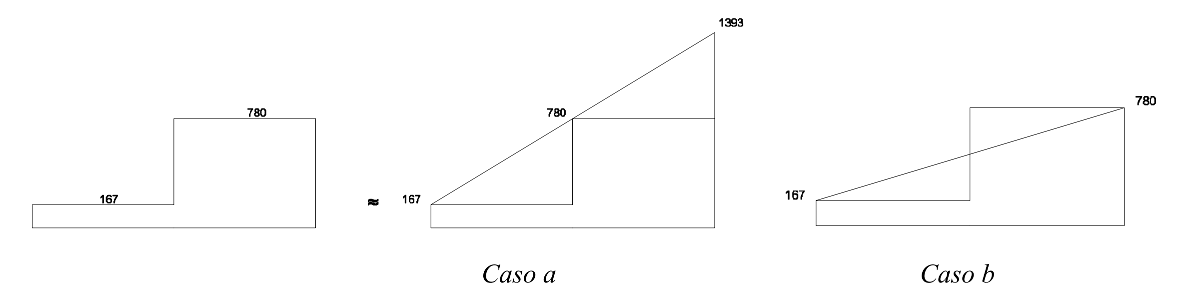
$$L_k = L \times \sqrt{\frac{1 + a \times N_{min} / N_{max}}{b}}$$

Nuestro caso no corresponde con ninguno del CTE, tomemos para empezar
L_k = 10,08
Recordar que $\lambda \geq 200$.

Sección	A (cm^2)	i	λ	$\bar{\lambda}$	Curva	X	$N_{b,Rd}$
HEB-120	34,0	3,06	329	3,8>3	C	0,006	
HEB-200	78,1	5,07	198,8	2,29	C	0,155	316,8<780
HEB-220	91,0	5,59	180,3	2,08	C	0,184	438<780
HEB-240	106	6,08	166	1,91	C	0,212	589<780
HEB-260	118,4	6,58	153	1,76	C	0,242	752<780
HEB-280	**131,4**	**7,09**	**142**	**1,64**	**C**	**0,274**	**942>780**

Posible ajuste del cordón inferior (6.3.2.2, CTE-SE-A)

Tenemos dos opciones:



Caso a *Caso b*

En los dos casos tenemos variación lineal con máximo en extremo, doblemente articulada, por lo que los valores de a y b son los mismos en los dos casos:
a = 0,88, b = 1,88

$$L_k = L \times \sqrt{\frac{1 + aN_{min}/\ N_{max}}{b}}$$

-Caso a:

$$L_k = 10{,}08 \times \sqrt{\frac{1 + 0{,}88 \times 167\ /\ 1393}{1{,}88}} = 7{,}73\ m$$

	A	i	λ	$\bar{\lambda}$	Curva	*X*	
HEB-260	118,4	6,58	117	1,35	c	0,36	1138>780
HEB-240	**106**	**6,08**	**127**	**1,46**	**c**	**0,33**	**905>780**
HEB-220	91,0	5,59	138	1,59	c	0,29	682<780

-Caso b:

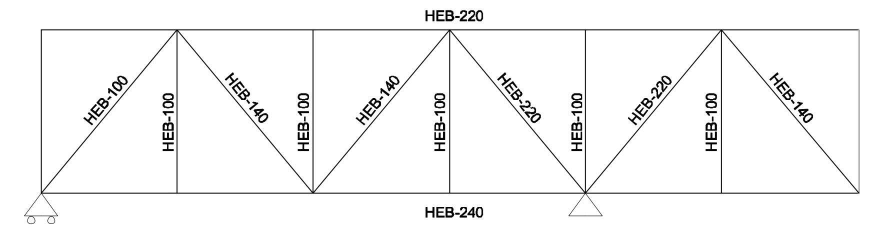
$$L_k = 10{,}08 \times \sqrt{\frac{1 + 0{,}88 \times 167\ /\ 780}{1{,}88}} = 8{,}01\ m$$

Este ajuste da un valor de L_k algo mayor que el del caso a, por lo que estamos del lado de la seguridad.

	A	i	λ	$\bar{\lambda}$	Curva	*X*	
HEB-260	118,4	6,58	122	1,40	c	0,35	1106>780
HEB-240	**106**	**6,08**	**132**	**1,52**	**c**	**0,33**	**905>780**
HEB-220	91,0	5,59	143	1,65	c	0,27	635<780

En los dos casos llegamos al mismo dimensionado.

-Resumen de dimensionado:

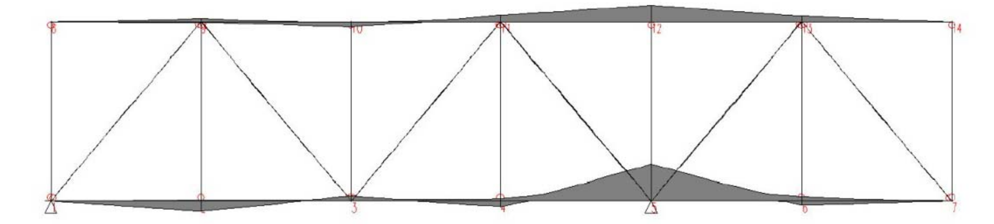


Según el cálculo para el cordón superior nos cumple un HEB-180, sin embargo para facilitar las uniones, se opta por un HEB-220, ya que llegan diagonales de este tamaño.

3.5-Deformaciones:

Se realiza un nuevo análisis con las secciones reales. Se obtiene una deformada en el voladizo de:
$\delta_g = 1{,}373$ cm
$\delta_q = 0{,}418$ cm
$\delta_2 = 1{,}373 + 0{,}60 \times 0{,}418 = 1{,}624$ cm
$L = 2 \times 5{,}04 = 10{,}08$ m
$\frac{\delta_2}{L} = \frac{1}{620} \ll \frac{1}{300}$ valor límite

3.6- Momentos en la celosía:
Es conveniente hacer un análisis con los cordones empotrados, ya que es una pieza robusta. Se obtienen flectores:



$M_{Ed,sup} = 28{,}0$ kNm
$M_{Ed,inf} = 61{,}8$ kNm
Cordón inferior:
$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{780}{905} + \frac{61{,}8}{275{,}8} = 1{,}09 > 1{,}00$, aparentemente no cumple.
$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \times f_{yd} = 275{,}78$ kNm
Cordón superior:
$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{1423}{1710} + \frac{28{,}0}{216} = 0{,}96 < 1{,}00$, cumple
$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \times f_{yd} = 216{,}6$ kNm
Ajuste del cálculo para el cordón inferior:
$\lambda_y = \frac{252}{10{,}31} = 24{,}4$
$X_y = 0{,}97$, curva b
$\frac{N_{Ed}}{X_z \times N_{pl,Rd}} + \alpha_y \times k_y \times \frac{c_{my} \times M_{yEd}}{M_{y,pl,Rd}} \leq 1$ (CTE SE-A, (6.52))

$\alpha_y = 0{,}60$, según la tabla 6.8 del CTE-SE-A

$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0{,}2) \times \frac{N_{Ed}}{X_y N_{cRd}} = 1 + (0{,}28 - 0{,}2) \times \frac{780}{0{,}97 \times 106 \times 26{,}19} = 1{,}023$, según la tabla 6.9 del CTE-SE-A.

$c_{my} = 0{,}6 + 0{,}4 \times 0 = 0{,}6 \geq 0{,}4$, según la tabla 6.10 del CTE-SE-A

Entonces,
$\frac{N_{Ed}}{X_z \times N_{pl,Rd}} + \alpha_y \times k_y \times \frac{c_{my} \times M_{yEd}}{M_{y,pl,Rd}} = \frac{780}{905} + 0{,}60 \times 1{,}023 \times \frac{0{,}6 \times 61{,}8}{275{,}8} = 0{,}94 < 1$, cumple

NOTAS

CUADERNO



Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

